

PCT
WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro
INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

<p>(51) Internationale Patentklassifikation ⁶ : H01S</p>	<p>A2</p>	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 99/54970</p> <p>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 28. Oktober 1999 (28.10.99)</p>		
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top; padding: 5px;"> <p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP99/02724</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 22. April 1999 (22.04.99)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>198 17 848.4</div> <div>22. April 1998 (22.04.98)</div> <div>DE</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>198 25 827.5</div> <div>10. Juni 1998 (10.06.98)</div> <div>DE</div> </div> </p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): CARL BAASEL LASERTECHNIK GMBH [DE/DE]; Peterbrun- ner Strasse 1b, D-82319 Starnberg (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): LANGHANS, Lutz [DE/DE]; Fasanenweg 25, D-82319 Starnberg (DE). RENNER, Thomas [DE/DE]; Starnberger Strasse 21, D-81476 München (DE).</p> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top; padding: 5px;"> <p>(81) Bestimmungsstaaten: DE, JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p>Veröffentlicht <i>Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.</i></p> </td> </tr> </table>			<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP99/02724</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 22. April 1999 (22.04.99)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>198 17 848.4</div> <div>22. April 1998 (22.04.98)</div> <div>DE</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>198 25 827.5</div> <div>10. Juni 1998 (10.06.98)</div> <div>DE</div> </div> </p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): CARL BAASEL LASERTECHNIK GMBH [DE/DE]; Peterbrun- ner Strasse 1b, D-82319 Starnberg (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): LANGHANS, Lutz [DE/DE]; Fasanenweg 25, D-82319 Starnberg (DE). RENNER, Thomas [DE/DE]; Starnberger Strasse 21, D-81476 München (DE).</p>	<p>(81) Bestimmungsstaaten: DE, JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p>Veröffentlicht <i>Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.</i></p>
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP99/02724</p> <p>(22) Internationales Anmeldedatum: 22. April 1999 (22.04.99)</p> <p>(30) Prioritätsdaten: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>198 17 848.4</div> <div>22. April 1998 (22.04.98)</div> <div>DE</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>198 25 827.5</div> <div>10. Juni 1998 (10.06.98)</div> <div>DE</div> </div> </p> <p>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): CARL BAASEL LASERTECHNIK GMBH [DE/DE]; Peterbrun- ner Strasse 1b, D-82319 Starnberg (DE).</p> <p>(72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): LANGHANS, Lutz [DE/DE]; Fasanenweg 25, D-82319 Starnberg (DE). RENNER, Thomas [DE/DE]; Starnberger Strasse 21, D-81476 München (DE).</p>	<p>(81) Bestimmungsstaaten: DE, JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).</p> <p>Veröffentlicht <i>Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.</i></p>			
<p>(54) Title: RESONATOR ARRAY FOR SOLID-STATE LASERS</p> <p>(54) Bezeichnung: RESONATORANORDNUNG FÜR FESTKÖRPERLASER</p> <p>(57) Abstract</p> <p>The invention relates to a stable resonator for solid-state lasers exhibiting a thermal refractive effect, comprising a laser rod, a retroreflector and an output mirror. The invention is characterized in that the resonator has an extremely asymmetrical configuration allowing the laser rod to move totally or almost completely towards the side of the output mirror. The laser rod is curved in a convex manner on one end in order to achieve a refractive effect and a convex retroreflector is provided. Due to its extreme asymmetry, the resonator has a beam quality as a function of the pumping power with a comparatively flat maximum even in the case of relatively short resonator lengths in contrast with the state of the art. The effects of the thermal lens have practically no influence on processing results. Starting pulse behavior lies below the detection limit.</p> <p>(57) Zusammenfassung</p> <p>Beschrieben wird ein stabiler Resonator für Festkörperlaser, die eine thermische Linsenwirkung zeigen, mit einem Laserstab, einem Rückspiegel sowie einem Auskoppelspiegel. Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, daß der Resonator extrem asymmetrisch aufgebaut ist, so daß der Laserstab ganz oder nahezu vollständig auf die Seite des Auskoppelspiegels verschoben ist. Der Laserstab ist an einem Ende konvex gekrümmt, um eine Linsenwirkung zu erzielen und es ist ein konvexer Rückspiegel vorgesehen. Durch die extreme Asymmetrie wird ein Resonator zur Verfügung gestellt, dessen Strahlqualität als Funktion der Pumpleistung ein vergleichsweise flaches Maximum auch bei im Gegensatz zum Stand der Technik relativ kurzen Resonatorlängen besitzt. Die Effekte der thermischen Linse haben dann praktisch keinen Einfluß auf das Bearbeitungsergebnis; das Erstpulsverhalten liegt unter der Nachweisgrenze.</p>				

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidshan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

Resonatoranordnung für Festkörperlaser

Technisches Gebiet und Stand der Technik

In den letzten Jahren haben vermehrt Nd:YAG Schweißlaser Einzug in den Schmuck- und Dentaltechnikbereich gehalten. Mit diesen sogenannten Handschweißlasern können präzise Punkt- und Nahtschweißungen im Sub-Millimeter Bereich durchgeführt werden. Neben dem Vorteil der lotfreien Verbindungen ist vor allem die thermische Schonung im Vergleich zur bisherigen Flammtechnik hervorzuheben. Alle marktüblichen Geräte haben einen typischen Aufbau, wie er in Abb. 1 dargestellt ist. Die dabei verwendeten üblichen „klassischen“ Resonatoren sind zumeist so aufgebaut, wie in Abb. 2a zu erkennen, mit einem planen Auskoppelspiegel 2 und einem konkaven Rückspiegel 3. Der Nd:YAG Laserstab 1 sitzt ungefähr in der Mitte zwischen den Spiegeln 2 und 3. Der ausgekoppelte Laserstrahl 4 wird über eine Strahlaufweitung 5 mit Divergenzverstellung, einen Umlenkspiegel 6 (zum Beispiel 1064 nm - HR, visuell -AR) und eine Fokussierlinse 7 in die Bearbeitungsebene 8 fokussiert.

Alle Geräte haben mit dem Problem der „thermischen Linse“ des Nd:YAG-Stabes und dem damit verbundenen „Erstpulsverhalten“ zu kämpfen. Dieses Problem läßt sich auf die sogenannte thermische Linse im Nd:YAG-Stab zurückführen. Durch das Pumpen über eine Blitzlampe und die Wasserkühlung stellt sich im Nd:YAG-Stab ein radiales Temperaturprofil ein, welches sich über die charakteristische Materialkonstante dn/dT in ein Brechungsindexprofil und somit in eine Linsenwirkung transformiert. Abhängig von der bereits eingestrahlten Pumpenergie bzw. der Kühlung durch das Kühlwasser ist diese Linsenwirkung von der Pumpleistung abhängig. In Abb. 3 ist das Erstpulsverhalten beim "klassischen" Resonator gemäß dem Stand der Technik dargestellt als eine Simulation der Spotgröße im Fokus ohne Aufweitung in

Abhängigkeit von der Pumpleistung, d.h. bei variierender thermischer Linse und für verschiedene Radien des Rückspiegels. Man erkennt deutlich das Ansteigen des Fokusdurchmessers mit steigender Pumpleistung. Kleinere Krümmungsradien des Rückspiegels führen zwar zu einer geringeren relativen Änderung, aber insgesamt zu größeren Werten des Fokusdurchmessers. Bei Einzelpulsen oder bei Erstpulsen (niedrige Pumpleistung) ist die Linsenwirkung noch gering, beim Dauerpulsen (hohe Pumpleistung) mit einer eingestellten Frequenz baut sich die Linse bis zu einem Wert auf, der von der mittleren Pumpleistung im Dauerbetrieb abhängt. Durch diese Linsenwirkung wird sowohl die Strahlqualität und somit die Spotgröße in der Bearbeitungsebene als auch (geringfügiger) die Pulsenergie beeinflusst. Für den Benutzer, dessen relevante Größe die Energiedichte, also die Pulsenergie dividiert durch die Spotgröße ist, stellt sich dieses Phänomen je nach Schweißvorgeschichte in stark varrierenden Schweißergebnissen dar.

Eine Möglichkeit, dieses Problem zu umgehen, besteht darin, den Laserstrahl durch eine hinreichend lange Glasfaser zu übertragen. Da die Glasfaser den Durchmesser des Strahls nicht konserviert, hat der ausgekoppelte Strahl in der Regel einen konstanten Durchmesser und eine nahezu konstante Divergenz. Allerdings wird durch diese Methode die Strahlqualität derart verschlechtert, daß die Fokussiereinheit entsprechend angepaßt werden muß und dadurch die sogenannte „Gutmütigkeit“ des Schweißprozesses leidet, weil die Schärfentiefe in der Bearbeitungsebene geringer wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, eine stärkere Aufweitung vor dem Strahlteiler einzusetzen und außerhalb des Fokusbereichs in der Nähe der gleich groß bleibenden Abbildung der Staboberfläche zu arbeiten. Dadurch reduziert sich ebenfalls das Erstpulsverhalten. Allerdings verschlechtert sich gleichzeitig wieder die „Gutmütigkeit“ (Schärfentiefe des Laserfokussystems in der Bearbeitungsebene).

In der Druckschrift MAGNI, V., et.al.: "Recent developments in laser resonator design" in Optical and Quantum Electronics 23, 1991, Seite 1105 - 1134, insbesondere Seite 1106, 2. Absatz, wird auf weitere Maßnahmen verwiesen, um bei stabilen Resonatoren dem Effekt der thermischen Linse entgegenzuwirken oder diesen zu kompensieren. Diese bekannten Maßnahmen sind jedoch nur bei einem bestimmten Wert der Pumpleistung wirksam.

Darstellung der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen stabilen Resonator anzugeben, der nicht nur bei einem bestimmten Wert der Pumpleistung, sondern über einen größeren Bereich der Pumpleistung ohne negativen Auswirkungen durch thermische Linseneffekte bleibt, der also insbesondere das Erstpulsverhalten bis unter die Nachweisgrenze des Benutzers reduziert und gleichzeitig die Gutmütigkeit, d.h. die Schärfentiefe des Lasers beibehält.

Die Lösung dieser Aufgabe erfolgt durch Resonatoren, wie sie in den nebengeordneten Patentansprüchen 1, 3, 4 und 5 angegeben sind. Die Anmelderin hat nämlich erkannt, daß durch den extrem asymmetrischen Aufbau der erfindungsgemäßen Resonatoren die Strahlqualität als Funktion der Pumpleistung ein vergleichsweise falsches Maximum auch bei im Gegensatz zum Stand der Technik relativ kurzen Resonatorlängen besitzt. Dadurch hat der Anwender über einen größeren Pumpleistungsbereich eine vergleichsweise konstante Strahlqualität. Im Ergebnis haben die thermischen Linseneffekte dann keine oder nur vernachlässigbare geringe Auswirkungen auf das Schweißergebnis; das Erstpulsverhalten ist vernachlässigbar gering. Während der Laserstab in den Ausführungsformen gemäß den nebengeordneten Patentansprüchen 1 und 4 vollständig auf die Auskoppelseite verschoben ist, können auch Ausführungsformen vorteilhaft sein, bei denen der Laserstab gemäß den Ansprüchen 3 und 5 in einem extrem kurzen Abstand zum Auskoppelspiegel angeordnet ist.

Nachfolgend soll die Erfindung anhand von Figuren und Diagrammen mit berechneten sowie gemessenen Werten näher erläutert werden. Es zeigen:

Fig. 1 Nd:YAG Schweißlaser gemäß dem Stand der Technik

Fig. 2a klassischer Resonator gemäß dem Stand der Technik

Fig. 2b erste Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Resonators (sog. "Sweet-Spot"-Resonator I)

Fig. 2c zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Resonators (sog. "Sweet-Spot"-Resonator II)

Fig. 3 Simulation des Erstpulsverhaltens bei einem klassischen Resonator gemäß dem Stand der Technik

Fig. 4 Fokusbereich beim Stand der Technik (obere Kurve) und beim erfindungsgemäßen "Sweet-Spot"-Resonator (untere Kurve) als Funktion der Pumpleistung (Simulation)

Fig. 5 Fokusbereich beim Stand der Technik (oberste Kurve) und beim erfindungsgemäßen "Sweet-Spot"-Resonator für verschiedene Laserstäbe (untere vier Kurven) als Funktion der Pumpleistung (Meßwerte)

Fig. 6 Strahlqualität M als Funktion der Pumpleistung im Multimodebetrieb für eine Resonatoranordnung mit $L=650\text{mm}$, $R=\text{unendlich}$, $f=\text{unendlich}$ (Kurve 1) und $f=1800\text{mm}$ (Kurve 2)

Gemäß Fig. 2b weist der erfindungsgemäße Resonator eine extrem asymmetrische Konfiguration auf. Der Laserstab 1 ist auf der Auskoppelseite plan und vollständig auf die Auskoppelseite verschoben, wo zum Auskoppeln des Laserstrahls 4 das plane Stabende mit einer teilreflektierenden Schicht 10 versehen ist.

Das andere Stabende 11 ist konvex gekrümmt und dient als Sammellinse im Resonator. Der Rückspiegel 12 ist ebenfalls konvex gekrümmt. Diese spezielle Anordnung der Komponenten führt bei entsprechender Auslegung der Resonatorlänge und der jeweiligen Krümmungsradien zu einem Resonator, der bei kurzer Baulänge einen kleinen Fokus erzeugt, welcher nahezu unabhängig von der Frequenz bzw. Pumpleistung ist. Eine mögliche Auslegung der Komponenten sieht dabei wie folgt aus:

Resonatorlänge: 290 mm

Krümmungsradius des Rückspiegels: 0.1 m Konvex (cvx)

Krümmungsradius Nd:YAG Stab: 0.22 m Konvex (cvx)

Länge des Nd:YAG Stabes: 90 mm

Auf diesen Resonator beziehen sich auch die in Fig. 5 vorgestellten Meßergebnisse.

Fig. 4 zeigt zunächst den Vergleich eines „klassischen“ Resonators (obere Kurve) mit dem neuen „sweet spot“ Resonator gemäß Fig. 2b (untere Kurve) in der Simulation. Wie deutlich zu sehen ist, hat der „sweet spot“ Resonator nicht nur einen nahezu konstanten Fokusbereich, während beim „klassischen“ Resonator der Fokusbereich mit steigender Pumpleistung und damit zunehmender thermischer Linse zunimmt; der Fokusbereich ist auch noch im gesamten Bereich deutlich kleiner. Diese gerechneten Ergebnisse werden bestätigt durch die Messungen in Abb. 5 (1 Stab beim "Stand der Technik", 4 verschiedene Stäbe beim erfindungsgemäßen "sweet spot" Resonator). Gemessen wurde mit einer CCD-Kamera; weitere Daten: Fokussierlinse mit $f=116\text{mm}$, $P_{\text{max}}=1,5\text{ KW}$ und Abstand Fokussierlinse zu Stabende= 450mm .

Ähnliche Ergebnisse können mit leicht modifizierten Parametern (Krümmungsradien & Resonatorlänge) erzielt werden.

Das hervorzuhebende Merkmal ist, daß unter Verwendung von zwei konvex gekrümmten Radien (Rückspiegel & Stab) die Resonatorlänge bei den verwendeten Pumpleistungen auf einen Wert, der erheblich unter 500 mm liegt, reduziert werden kann.

Ausgehend von einem im Handel erhältlichen Rechenprogramm für Resonatoren und der der Anmelderin zuzuschreibenden Erkenntnis, daß gerade bei einem extrem asymmetrischen Resonator die thermischen Linseneffekte auch über einen größeren Pumpleistungsbereich ohne Einfluß auf das Schweißergebnis sind, können weitere Resonatorkonfigurationen wie folgt ermittelt werden.

Mit dem Rechenprogramm für Resonatoren wird die Strahlqualität M_2 in Abhängigkeit von der Pumpenergie berechnet und als Kurve ausgedruckt (Fig. 6). (Es soll sein: $M_2 = M^2$)

1. Das Programm wird gestartet mit einem extrem asymmetrischen plan-plan-Resonator, d.h. der Laserstab ist nicht gekrümmt (entspricht einer internen Linse mit der Brennweite $f = \infty$ und die Krümmungsradien von Rückspiegel und Auskoppelspiegel sind jeweils $R = \infty$; mit diesen Randbedingungen wird die Strahlqualität M_2 in Abhängigkeit von der Pumpenergie für verschiedene Werte der Resonatorlänge L berechnet und durch Ausprobieren derjenige Wert von L (L_0) bestimmt, bei dem die Strahlqualität den gewünschten Maximumwert besitzt, (vorliegend soll der Maximumwert $M_2 = 25$ sein, ein typischer Wert für Laserschweißanwendungen). Bei der Variation von L verändert sich die Lage des Maximums nicht, jedoch wird die Kurve nach oben ausgeweitet (für Werte L kleiner als L_0) oder nach unten zusammengestaucht (für Werte L größer als L_0).

2. Falls das Maximum der Strahlqualität $M2$ nicht in dem Bereich der Pumpleistung liegt, in dem die Anlage gemäß der anwendungsspezifischen Vorgabe betrieben werden soll, wie dies bei dem asymmetrischen plan-plan Resonator vorliegend der Fall ist, wird der Krümmungsradius des Laserstabendes, das dem Rückspiegel zugewandt ist, variiert von plan, also $R(\text{Stab}) = \text{unendlich}$, zu endlichen Werten abnehmend. Anstelle des Krümmungsradius des Laserstabendes kann auch die durch die gekrümmte Fläche gebildete Linse zur Charakterisierung des Resonators herangezogen werden. Die Brennweite des gekrümmten Laserstabendes wird also von plan, d.h. $f = \text{unendlich}$ zu endlichen Werten abnehmend variiert. Es werden also verschiedene f -Werte in das Rechenprogramm eingesetzt, wobei sich mit abnehmenden f -Werten das Maximum nach links zu kleineren Pumpleistungen verschiebt. Durch Ausprobieren wird der f_0 -Wert bestimmt, bei dem das Maximum der Kurve in der Mitte des gewünschten Pumpleistungsbereichs liegt, vorliegend also bei 1kW, Bereich 0 bis 2 kW.
3. Soll für denselben Wert von $M2=25$ ein kürzerer Resonator zur Anwendung kommen, um eine kompaktere Anlage zu erhalten (Regelfall), wird wie oben unter Punkt 1. für einen plan-plan Resonator, d.h. der Laserstab ist nicht gekrümmt (entspricht einer internen Linse mit der Brennweite $f = \text{unendlich}$) und die Krümmungsradien von Rückspiegel und Auskoppelspiegels sind unendlich, die Strahlqualität $M2$ in Abhängigkeit von der Pumpenergie berechnet. Da L nun kleiner als L_0 ist, liegt das Maximum nun höher als $M2=25$ (siehe oben Punkt 1., letzter Satz). Nun verkleinert man den Radius R des Rückspiegels solange, bis das Maximum wieder bei 25 liegt.

4. Anschließend wird die Brennweite des gekrümmten Laserstab-
endes entsprechend Punkt 2. verkleinert, bis das Maximum
wieder in der Mitte des gewünschten Pumpleistungsbereichs
liegt, vorliegend also bei 1kW, Bereich 0 bis 2kW. Damit hat
man einen neuen Resonator mit den geforderten Eigenschaften.

In der gleichen Weise kann man für $M2=25$ weitere Resonatorauf-
bauten ermitteln, indem man zu dem gewünschten L durch Anpassung
von R das Maximum auf 25 einstellt und durch Variation von f die
Lage des Maximums verschiebt. Entsprechend kann man für andere
Werte von $M2$ und den gewünschten Resonatorlängen L die zugehöri-
gen Werte von R und f bestimmen.

Nachfolgend sind einige Werte für einen erfindungsgemäßen
"Sweet-Spot"-Resonator angegeben, wobei die Stablänge 85mm be-
trägt. Bei anderen Stablängen ergeben sich geringfügige Ab-
weichungen.

L (Länge des Resonators) mm	f (Brennweite der internen Linse) mm	R (Radius des Rückspiegels) mm
650	1800	$-\infty$
320	325	-170
290	270	-100
265	230	- 85
215	155	- 40

Man kann die Werte der Tabelle auch rein empirisch durch
Formeln beschreiben:

$$R = \text{const} \times (L/L_0 - L)^2$$

$$f = f_0 \times (L/L_0)^{2,4}$$

In einer zweiten Ausführungsform gemäß Fig. 2c ist der erfindungsgemäße "sweet spot" Resonator II so ausgestaltet, daß der Laserstab 1 auf seiner dem konvex gekrümmten Rückspiegel 12 zugewandten Seite plan ausgebildet ist und statt dessen auf der gegenüberliegenden Seite, also der Auskoppelseite, konvex gekrümmt und teilverspiegelt ist. Diese Ausgestaltung hat dieselben Vorteile wie der "sweet spot" Resonator I, der in Fig. 2b dargestellt ist. Bei entsprechender Auslegung der Resonatorlänge und der jeweiligen Krümmungsradien führt auch diese spezielle Anordnung der Komponenten zu einem Resonator, der bei kurzer Baulänge einen kleinen Fokus erzeugt, welcher nahezu unabhängig von der Frequenz bzw. Pumpleistung ist.

Nachfolgend sind einige Werte für einen erfindungsgemäßen "Sweet-spot"-Resonator II angegeben (Stablänge=85mm).

L (Länge des Resonators) mm	A (Radius des Auskoppel Spiegels bzw. Stabendes) mm	R (Radius des Rückspiegels) mm
650	2000	- ∞
320	400	-240
290	350	-175
265	300	-140
215	215	- 70

Die Tabelle wurde wie beim "Sweet-spot"-Resonator I erstellt.

Mit einem handelsüblichen Rechenprogramm für Resonatoren wird die Strahlqualität M2 in Abhängigkeit von der Pumpenergie berechnet und als Kurve ausgedruckt.

1. Für einen plan-plan-Resonator mit $A=\infty$ wird die Länge L_0 bestimmt, sodaß das maximale M_2 einen vorgegebenen Wert annimmt (in diesem Fall $M_2=25$).
2. Danach wird A_0 so bestimmt, daß das Maximum der Kurve in der Mitte des gewünschten Pumpleistungsbereiches liegt (in diesem Fall bei 1 kW, Bereich 0-2 kW).

Damit ist die erste Zeile vollständig.

Wenn man kürzere Resonatoren mit gleichen Eigenschaften haben will, geht man folgendermaßen vor:

3. Man berechnet die M_2 Kurve für die kürzere Länge $L < L_0$ und erhält eine Kurve, deren Maximum höher liegt als 25. Dann verkleinert man R solange, bis das Maximum wieder bei 25 liegt.
4. Danach verkleinert man A solange, bis das Maximum wieder in der Mitte des gewünschten Bereiches liegt.

Damit hat man einen neuen Resonator mit den geforderten Eigenschaften. Auf diese Art kann man für jedes vorgegebene M_2 und L die zugehörigen Werte von R und A bestimmen.

Man kann die Werte der Tabelle auch rein empirisch durch Formeln beschreiben:

$$R = C \times (L/L_0 - L) \exp. 1,9 \quad C = -254$$

$$A = A_0 \times (L/L_0) \exp 2,1$$

Anzumerken ist, daß die Pulsenergie ebenfalls nahezu unabhängig von der Vorgeschichte der Pumpleistung ist. Damit bleiben sowohl der Fokusbereich als auch die Energiedichte konstant, was für den Anwender von zentralem Interesse ist.

Das bevorzugte Anwendungsgebiet der Erfindung sind Nd:YAG-Schweißlaser mit einer Resonatorlänge kleiner 500 mm sowie einer maximalen Pumpdurchschnittsleistung bis 2 kW (entspricht etwa 60 W mittlerer Laserleistung).

Bezugszeichenliste

- 1 Nd:YAG Laserstab
- 2 Auskoppelspiegel
- 3 Konkaver Rückspiegel
- 4 Laserstrahl
- 5 Strahlaufweitung mit Divergenzverstellung
- 6 Umlenkspiegel
- 7 Fokussierlinse
- 8 Schärfenebene der Beobachtung (Bearbeitungsebene)
- 9 Beobachtungsrichtung
- 10 teilreflektierende Sicht
- 11 konvex gekrümmtes Stabende
- 12 konvex gekrümmter Rückspiegel

Resonatoranordnung für Festkörperlaser

Patentansprüche

1. Stabiler Resonator für Festkörperlaser, die eine thermisch induzierte Linsenwirkung zeigen, mit einem Laserstab, einem Rückspiegel und einem teilreflektierendem Auskoppelspiegel, dadurch gekennzeichnet, daß der Rückspiegel konvex gekrümmt ist, daß das dem Rückspiegel zugewandte Ende des Laserstabs ebenfalls konvex gekrümmt ist und daß der Auskoppelspiegel von dem anderen Ende des Laserstabs gebildet wird, wozu dieses Ende teilverspiegelt ist.

2. Resonator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das teilverspiegelte Ende des Laserstabs eben ausgebildet ist.

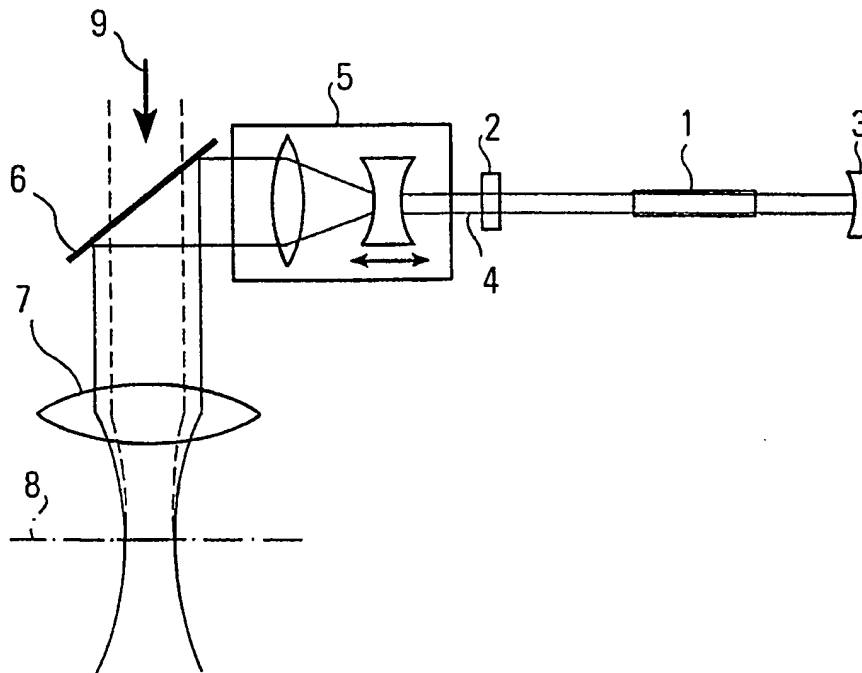
3. Resonator gemäß dem Oberbegriff von Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Rückspiegel konvex gekrümmt ist, daß das dem Rückspiegel zugewandte Ende des Laserstabs ebenfalls konvex gekrümmt ist und daß der Auskoppelspiegel in unmittelbarer Nähe zum Laserstabende angeordnet ist, vorzugsweise in einem Abstand von weniger als etwa 10 mm.

4. Stabiler Resonator für Festkörperlaser, die eine thermisch induzierte Linsenwirkung zeigen, mit einem Laserstab, einem Rückspiegel und einem teilreflektierendem Auskoppelspiegel, dadurch gekennzeichnet, daß der Rückspiegel konvex gekrümmt ist, daß das dem Rückspiegel zugewandte Ende des Laserstabs plan ist, daß das andere Ende des Laserstabs konvex gekrümmt ist, und daß der Auskoppelspiegel von dem anderen Ende des Laserstabs gebildet wird, wozu dieses Ende teilverspiegelt ist.

5. Resonator gemäß dem Oberbegriff von Patentanspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Rückspiegel konvex gekrümmt ist, daß das dem Rückspiegel zugewandte Ende des Laserstabs plan ist, daß das andere Ende des Laserstabs konvex gekrümmt ist, und daß der Auskoppelspiegel in unmittelbarer Nähe zum Laserstabende angeordnet ist, vorzugsweise in einem Abstand von weniger als etwa 10 mm.

6. Resonator nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei dem Laserstab um einen Nd:YAG-, Er:YAG-, Ho:YAG-, Nd:Glas-Stab handelt.

FIG.1



2/6

FIG.2a
STAND DER TECHNIK

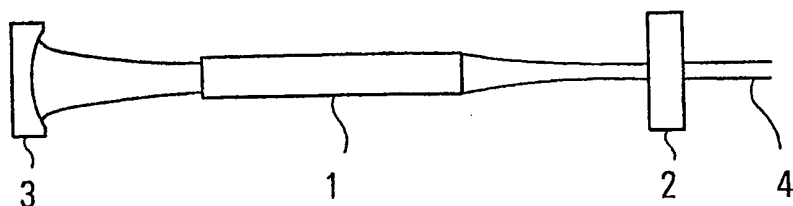


FIG.2b

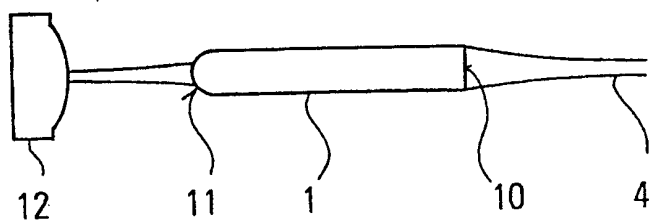
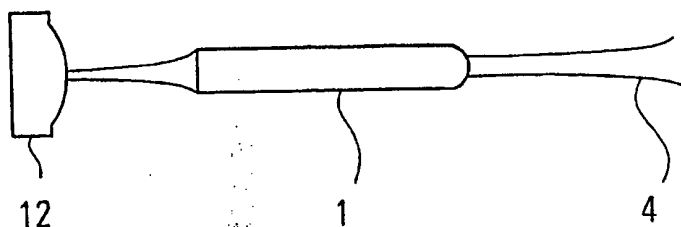


FIG.2c



3/6

FIG.3

ERSTPULSVERHALTEN BEI "KLASSISCHEM" RESONATOR
GEMÄSS DEM STAND DER TECHNIK
SIMULATION

FOKUSSIERLINSE: $f = 116 \text{ mm}$
ABSTAND FOKUSSIERLINSE-RESONATORENDE: 285 mm
RESONATORLÄNGE: 325 mm
STÄBLÄNGE: 90 mm
KRÜMMUNGSRADIUS RÜCKSPIEGEL: SIEHE LEGENDE
KRÜMMUNGSRADIUS AUSKOPPELSPIEGEL: PLAN

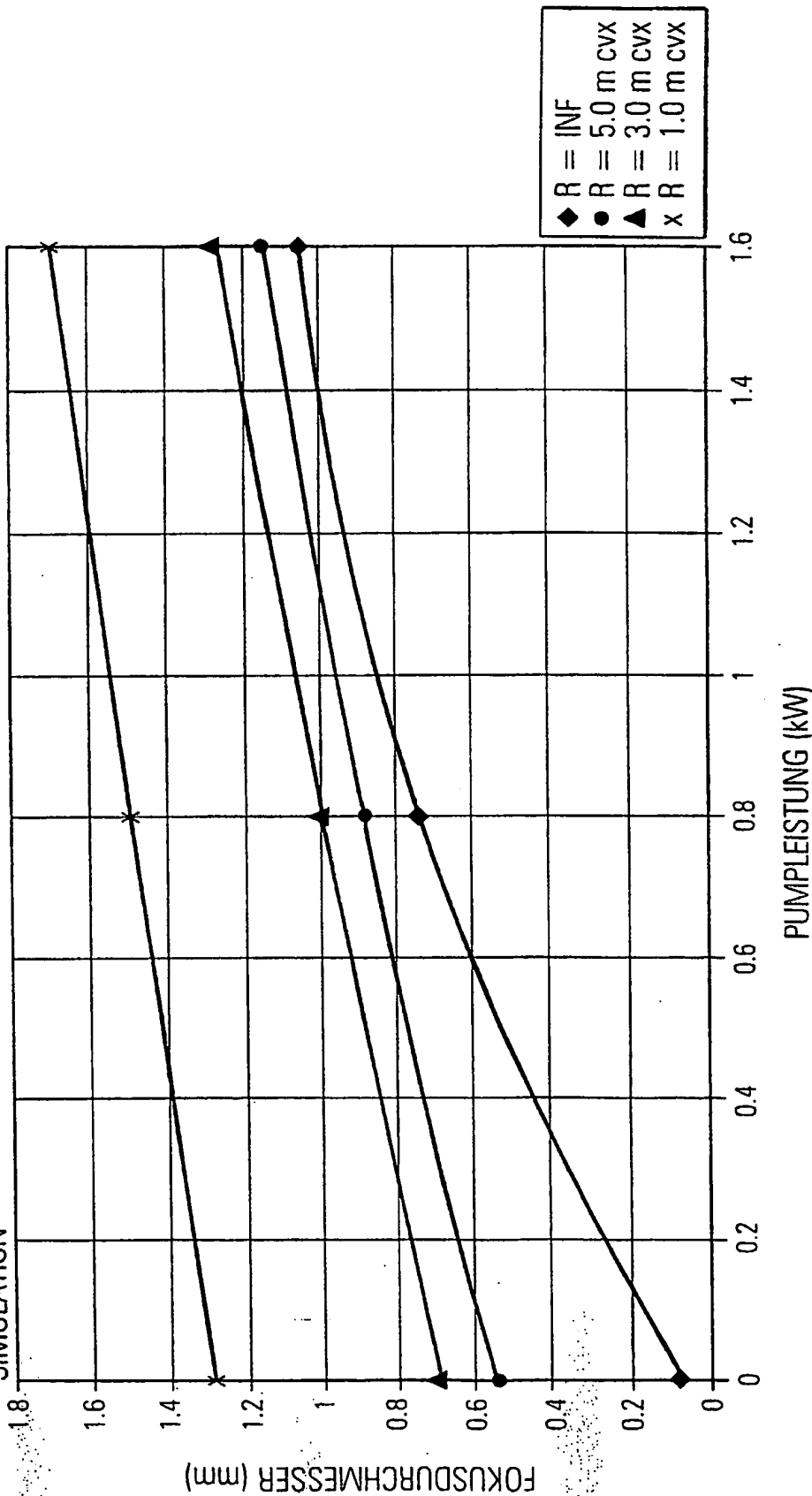
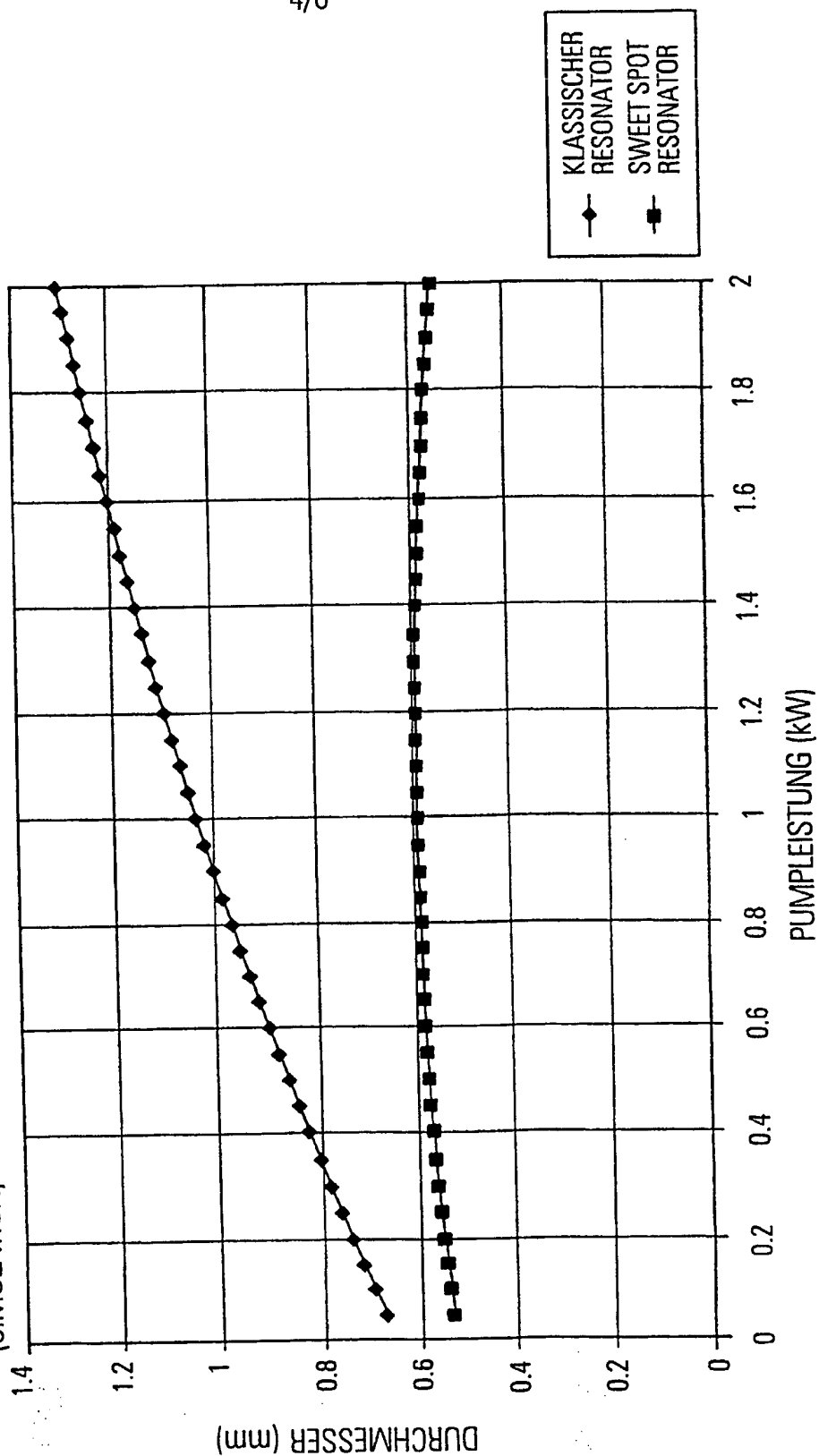
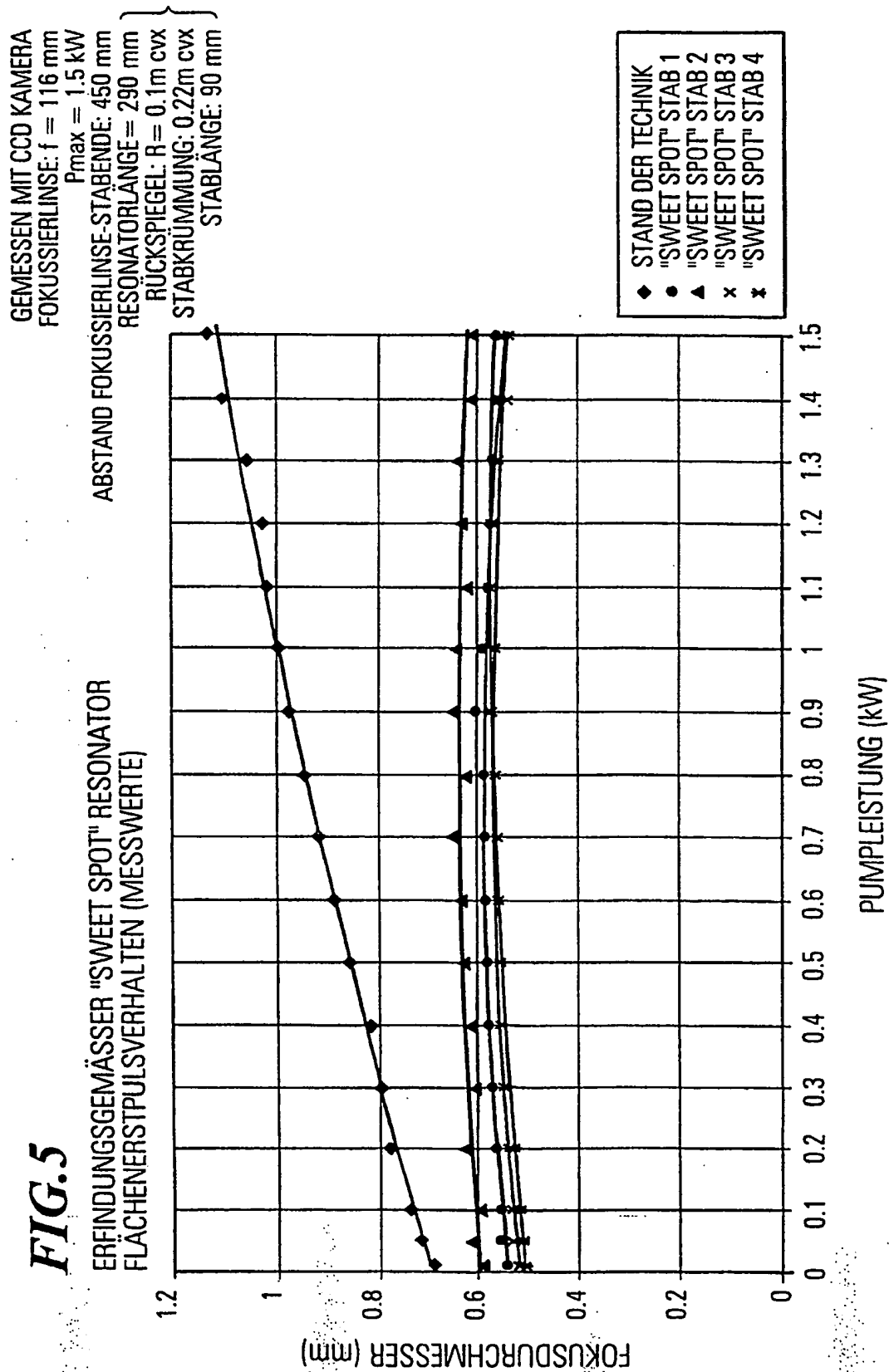
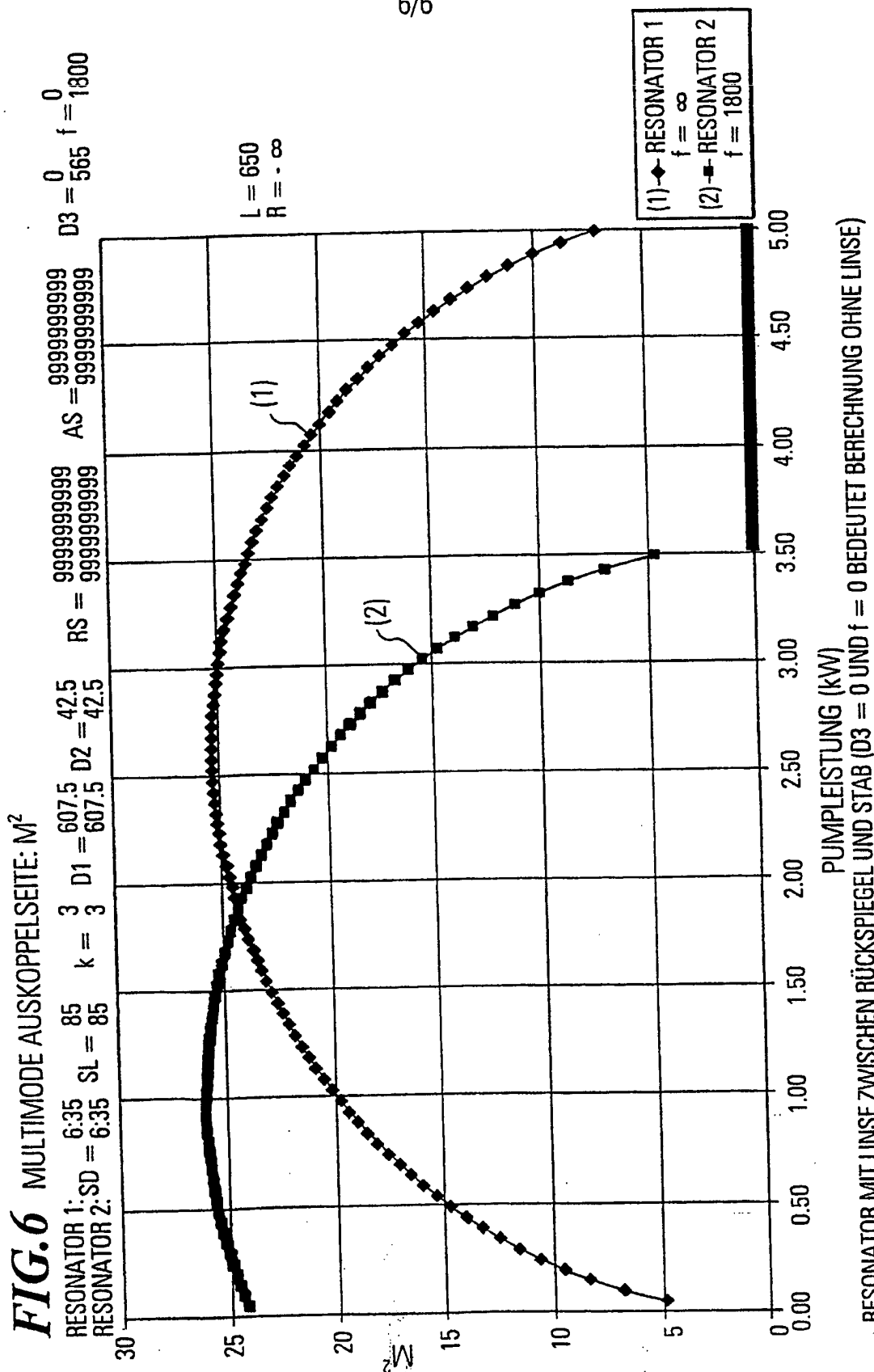


FIG. 4
VERGLEICH STAND DER TECHNIK MIT ERFINDUNGSGEMÄSSEM RESONATOR
(SIMULATION)





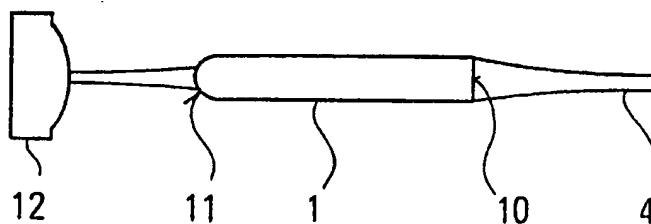


PCT
WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro
**INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)**

(51) Internationale Patentklassifikation ⁶: H01S 3/16, 3/08, B23K 26/00, 26/06	A3	(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 99/54970 (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 28. Oktober 1999 (28.10.99)
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP99/02724 (22) Internationales Anmeldedatum: 22. April 1999 (22.04.99) (30) Prioritätsdaten: 198 17 848.4 22. April 1998 (22.04.98) DE 198 25 827.5 10. Juni 1998 (10.06.98) DE (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): CARL BAASEL LASERTECHNIK GMBH [DE/DE]; Peterbrunner Strasse 1b, D-82319 Starnberg (DE). (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): LANGHANS, Lutz [DE/DE]; Fasanenweg 25, D-82319 Starnberg (DE). RENNER, Thomas [DE/DE]; Starnberger Strasse 21, D-81476 München (DE).	(81) Bestimmungsstaaten: DE, JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE). Veröffentlicht <i>Mit internationalem Recherchenbericht.</i> <i>Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche zugelassenen Frist. Veröffentlichung wird wiederholt falls Änderungen eintreffen.</i> (88) Veröffentlichungsdatum des internationalen Recherchenberichts: 2. Dezember 1999 (02.12.99)	

(54) Title: RESONATOR ARRAY FOR SOLID-STATE LASERS

(54) Bezeichnung: RESONATORANORDNUNG FÜR FESTKÖRPERLASER



(57) Abstract

The invention relates to a stable resonator for solid-state lasers exhibiting a thermal refractive effect, comprising a laser rod, a retroreflector and an output mirror. The invention is characterized in that the resonator has an extremely asymmetrical configuration allowing the laser rod to move totally or almost completely towards the side of the output mirror. The laser rod is curved in a convex manner on one end in order to achieve a refractive effect and a convex retroreflector is provided. Due to its extreme asymmetry, the resonator has a beam quality as a function of the pumping power with a comparatively flat maximum even in the case of relatively short resonator lengths in contrast with the state of the art. The effects of the thermal lens have practically no influence on processing results. Starting pulse behavior lies below the detection limit.

(57) Zusammenfassung

Beschrieben wird ein stabiler Resonator für Festkörperlaser, die eine thermische Linsenwirkung zeigen, mit einem Laserstab, einem Rückspiegel sowie einem Auskoppelspiegel. Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, daß der Resonator extrem asymmetrisch aufgebaut ist, so daß der Laserstab ganz oder nahezu vollständig auf die Seite des Auskoppelspiegels verschoben ist. Der Laserstab ist an einem Ende konvex gekrümmt, um eine Linsenwirkung zu erzielen und es ist ein konvexer Rückspiegel vorgesehen. Durch die extreme Asymmetrie wird ein Resonator zur Verfügung gestellt, dessen Strahlqualität als Funktion der Pumpleistung ein vergleichsweise flaches Maximum auch bei im Gegensatz zum Stand der Technik relativ kurzen Resonatorlängen besitzt. Die Effekte der thermischen Linse haben dann praktisch keinen Einfluß auf das Bearbeitungsergebnis; das Erstpulsverhalten liegt unter der Nachweisgrenze.

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidshan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP 99/02724

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 6: H 01 S 3/16, H 01 S 3/08, B 23 K 26/00, B 23 K 26/06

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 6: H 01 S, B 23 K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CA 1164990 A (SECRETARY OF THE ARMY, U.S.A.) 03 April 1984 (03.04.84) figure 1, claim.	1-6
A	US 4310808 A (BYER et al.) 12 January 1982 (12.01.82) the whole document, in particular figure 1, column 3, lines 43-55.	1-6
A	WO 90/13157 A1 (QUANTRONIX, CORP.) 01 November 1990 (01.11.90) the whole document, in particular figure 1, page 4, line 6.	1-6
A	US 5692005 A (MAAG et al.) 25 November 1997 (25.11.97)	

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.
 ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

30 August 1999 (30.08.99)

Date of mailing of the international search report

15.10.99

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office
Facsimile No.

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 99/02724

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

H 01 S 3/16, H 01 S 3/08, B 23 K 26/00, B 23 K 26/06

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

H 01 S, B 23 K

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	CA 1164990 A (SECRETARY OF THE ARMY, U.S.A.) 03. April 1984, Fig. 1, Ansprüche. --	1-6
A	US 4310808 A (BYER et al.) 12. Januar 1982. ganzes Dokument, insbesondere Fig. 1, Spalte 3, Zeilen 43- 55. --	1-6
A	WO 90/13157 A1 (QUANTRONIX, CORP.) 01. November 1990, ganzes Dokument, insbesondere Fig. 1, Seite 4, Zeile 6. --	1-6
A	US 5692005 A --	

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen☐ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist.

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

30 August 1999

Abschließdatum des internationalen Recherchenberichts

15.10.99

Name und Postanschrift der Internationale Recherchenbehörde
 Europäisches Patentamt, P.O. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 cpo nl,
 Fax (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

HEINICH e.h.

III. EINSCHLÄGIGE VERÖFFENTLICHUNGEN (Fortsetzung von Blatt 2)		
Art *	Kennzeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der maßgeblichen Teile	Betr. Anspruch Nr.
	(MAAG et al.) 25. November 1997. -----	

ANHANG

zum internationalen Recherchen-
bericht über die internationale
Patentanmeldung Nr.

ANNEX

to the International Search
Report to the International Patent
Application No.

ANNEXE

au rapport de recherche inter-
national relatif à la demande de brevet
international n°

PCT/EP 99/02724 SAE 235828

In diesem Anhang sind die Mitglieder
der Patentfamilien der im obenge-
nannten internationalen Recherchenbericht
angeführten Patentdokumente angegeben.
Diese Angaben dienen nur zur Unter-
richtung und erfolgen ohne Gewähr.

This Annex lists the patent family
members relating to the patent documents
cited in the above-mentioned inter-
national search report. The Office is
in no way liable for these particulars
which are given merely for the purpose
of information.

La présente annexe indique les
membres de la famille de brevets
relatifs aux documents de brevets cités
dans le rapport de recherche inter-
national visé ci-dessus. Les renseigne-
ments fournis sont donnés à titre indica-
tif et n'engagent pas la responsabilité
de l'Office.

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument Patent document cited in search report Document de brevet cité dans le rapport de recherche		Datum der Veröffentlichung Publication date Date de publication	Mitglied(er) der Patentfamilie Patent family members Membre(s) de la famille de brevets	Datum der Veröffentlichung Publication date Date de publication
CA A1	1164990	03-04-1984	keine - none - rien	
US A	4310808	12-01-1982	keine - none - rien	
WO A1	9013157	01-11-1990	US A	5148445 15-09-1992
US A	5692005	25-11-1997	DE A1	19507625 05-09-1996
			GB A0	9602904 10-04-1996
			GB A1	2310312 20-08-1997

BEST AVAILABLE COPY